基于 MATLAB 整流电路的建模仿真方法研究[1]

张建民，何怡刚，龙佳乐

(湖南大学电气与信息工程学院，湖南 长沙 410082)

摘要：MATLAB 软件是当今控制系统的设计与仿真中重要的工具软件。该软件仿真方便，结果直观、准确。本文以单相桥式全波可控整流电路及三相桥式全波可控整流电路为例，叙述了利用 MATLAB/SIMULINK 对整流电路进行建模仿真的方法，并给出了仿真结果波形。通过对仿真结果分析就可以将系统结构进行改进或将有关参数进行修改使系统达到要求的结果和性能，这样就可以极大地加快系统的分析或设计过程。

关键词：MATLAB；仿真；整流；电力电子

中图分类号：**TP391.9 TM46** 文献标识码：**B**

Research to Approach of Modeling and Simulating the Rectifier Circuit Based on MATLAB

ZHANG Jian-min，HE Yi-gang，LONG Jia-le

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, changsha 410082,China)

Abstract: The software MATLAB is an important tool in the design and simulation of control system. The simulation is convenient to be carried out, and also the wave can be simulated directly and correctly. The article takes the example of Single-Phase Full-Bridge Controlled Rectifier and Three-Phase Full-Bridge Controlled Rectifier, states an approach of modeling and simulating the Rectifier Circuit by using MATLAB/SIMULINK,and introduces the results and waveforms. User can quickly find out and analyze the results from simulation, then the construction of the system can be improved or some parameters in it can be modified as to meet the demanded results and performances.By which,the process of analyzeing and designing a system can be greatly fasten.

Key words:MATLAB;simulation;rectifier;Power Electronic

1 引 言

在电力电子电路如变流装置的设计过程中，需要对设计出来的初步方案（电路）及有关元件参数选择是否合理，效果如何进行验证。如果通过实验来检验，就要将设计的系统用元件安装出来再进行调试和试验，不能满足要求时，要更换元件甚至要重新设计、安装、调试，往往要反复多次才能得到满意的结果。这样将耗费大量的人力和物力，且使设计效率低下，耗资大，周期长。近年来计算机仿真技术在电力电子技术行业得到了广泛的应用，利用计算机进行仿真试验，则可大大地节约开支，提高设计效率，缩短设计周期。本文介绍了一种基于 Matlab 的计算机仿真工具—电力系统工具箱，采用 MATLAB/SIMULINK 可视化，图形化仿真环境来对电力电子电路进行建模仿真则可使之变得直观，简单易行，真实准确。

本文以单相桥式全波可控整流电路及三相桥式全波可控整流电路为例介绍了利用 MATLAB/SIMULINK 建立电力电子电路仿真模型并进行仿真的方法，给出了仿真结果波形。

2 电力系统工具箱简介

在 Matlab 命令窗口键入 Simulink 命令便打开 SIMULINK 的库浏览窗口，点击 SimPowerSystem，进入电力系统工具箱。也可以在 Matlab 命令窗口中输入“powerlib”，按回车键（Enter），就可以打开电力系统工具箱。电力系统工具箱包括了电路、电力电子、电机等电气工程学科中常用的元件模型，这些元件模型分布在 7 个模块库中，如

[1] 教育部新世纪优秀人才支持计划（NCET-04-0767）资助

图 1 所示。利用这些库模块及其它库模块，用户可方便、直观地建立各种系统模型并进行仿真。

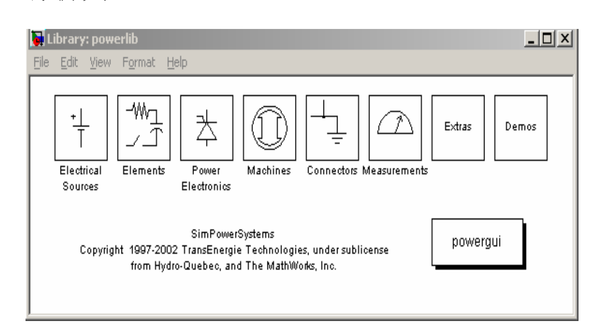


图 1　电力系统工具箱模块库

(1) 电源模块库(Electrical Sources)：包括交流、直流及可控的电压源和电流源。

(2) 元件模块库(Elements)：包括串联及并联的 RLC 支路负载、变压器、互感、开关等。

(3) 电力电子模块库(Power Electronics)：包括二极管、晶闸管、GTO、MOSFET、IGBT 等电力电子器件。还有通用桥(Universal Bridge)，它可设定成不同电力电子器件的单臂、双臂和三臂桥。

(4) 电机模块库(Machines)：直流、交流等各种电机模块。

(5) 连接模块库(Connectors)：包括地线、中性点、连结点等。

(6) 测量模块库(Measurements)：包括电流、电压等测量模块。

(7) 附加模块库(Extras)：主要有①控制模块库：内有同步 6 脉冲发生器、PWM 发生器、时钟、三相可编程电源等。②离散测量模块库：各种离散测量模块。③离散控制模块库：离散 PI、PID 控制器，离散 PWM 发生器和二阶滤波器等。④测量模块库：有交流调速中的 abc 到 dqo 的坐标变换等。⑤矢量模块库：序列分析器等。⑥附加电机模块库：有直流电机、离散直流电机等。

3　建模与仿真要点

利用 SIMULINK 建模非常方便，只要把所需的模块一一拖入建模窗口，设置好合适的参数，用适当的连线把它们连接好即可。但在具体操作中需要注意，在连线过程中一定要使连接点的单箭头变成粗黑箭头。若系统中有暂时不用的输入端子和输出端子，应该分别用接地(Ground)模块和终止(Terminator)模块将其封闭，以免仿真时在命令窗口出现不必要的警告提示，使得仿真不能进行。

构建系统模型时，应注意对电路器件等效参数的正确考虑，这与搭建实际电路存在很大差别。例如，电源电压用二极管全桥整流接大电容滤波电路，构建系统仿真模型时，在回路中应串入适当的电阻或电感元件扼制电流，否则理论上将出现无穷大的冲击电流而使仿真无法进行下去；实际电路中，不扼制电流虽然会引起大的电流冲击，但仍然可行。

仿真成功的关键是设置好仿真参数，这包括仿真的起始和终止时间，仿真算法，最大相对误差和最大绝对误差，变步长或固定步长等。参数的设置要根据模型的性质和仿真的需要而定，尤其是仿真算法的选取，在很大程度上决定了仿真的正确性和仿真时间。

4　典型仿真实例

整流电路（Rectifier）是电力电子电路中出现最早的一种，它将交流电变为直流电，应用十分广泛。下面以整流电路中应用最多的单相桥式可控整流电路和三相桥式可控整流电路，来说明 Matlab 在电力电子电路仿真中的应用。

4．1 单相桥式全控整流电路

打开新建模型窗口，将所需元件模块从模块库中拖入新建模型窗口并改名，设定有关参数后将各模块连接组成仿真模型，如图 2 所示。其中电源电压设定为 100V 有效值，频率为 50Hz。注意：触发脉冲“Pulse Generator1”和“Pulse Generator4”的控制角设置必须相同，“Pulse Generator2”和“Pulse Generator3”的控制角设置必须相同。

设置好各模块参数，点击下拉菜单仿真(Simulation)按钮，选择仿真参数(Simulation parameters)命令设定有关仿真参数。设定停止时间(Stop time)为 0.1 秒，仿真算法选择可变步长(Variable-step)积分算法函数 ode15s(stiff/NDF 法)，其它参数选项可用默

认值。然后点击启动仿真按钮(黑三角形)即开始进行仿真，双击显示模块（图 2 中 scope）就能显示其信号波形。

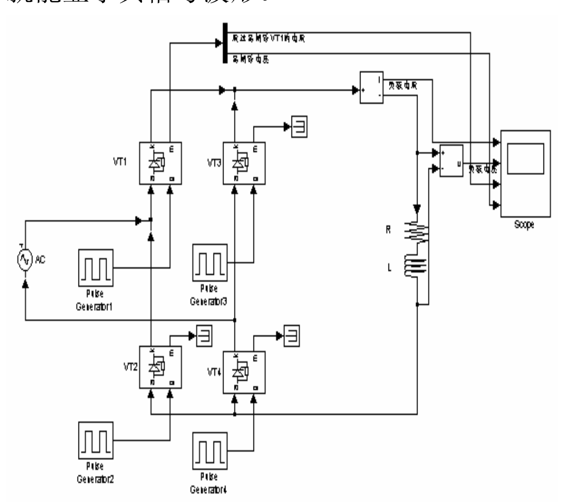


图 2　单相桥式可控整流电路

图 3、图 4 为图 2 所示单相桥式全控整流电路在触发角为 0°和 60°的仿真波形。图中通过流过晶闸管 VT1 的电流 Iak(A)波形，可清楚地看出电流换相过程。通过图中晶闸管 AK 之间的电压 Uak(V)波形，晶闸管在 0°或 60°承受正向电压，导通 180°，其余的时间承受反向电压。输出负载电流 Id(A)和输出负载电压 Vd(V)的波形，可清楚地看出电流由零增加到稳态值的过程，电流大小对晶闸管换流过程的影响。改变各个参数设定再进行仿真就可得到不同参数时的仿真波形，这样就为系统设计参数的确定提供了科学方便的手段。

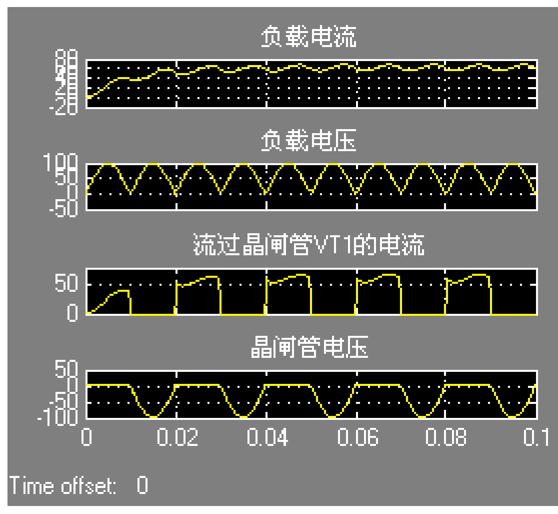


图 3　单相整流电路的仿真波形(0°)

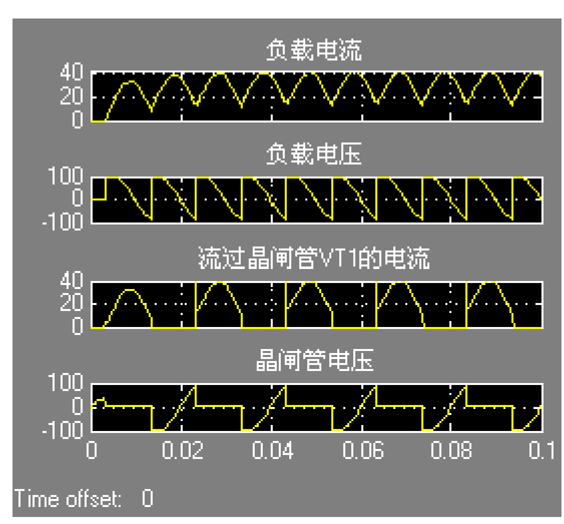


图 4　单相整流电路的仿真波形(60°)

4．2 三相桥式全控整流电路

图 5 给出了一个可包括单相、三相晶闸管整流桥的仿真模型(亦可用于有源逆变状态)。Matlab 6.5 版的电力系统工具箱提供了可设定为不同电力电子器件的通用桥(Universal Bridge)和同步 6 脉冲触发器(Synchronized 6-Pulse Generator)，使得相控电路的模型搭建很容易。6 脉冲触发器的同步电压要求是线电压，因此用电压测量模块将相电压转为线电压。在触发模块的参数设定中，频率选为与电源频率一致(例如 50Hz)，并选双脉冲触发形式。负载电路用一串联的 RL 电路，以便能分别模拟电阻负载、阻感负载的情况。例如，若为电阻负载，可令 L 的值均为零。

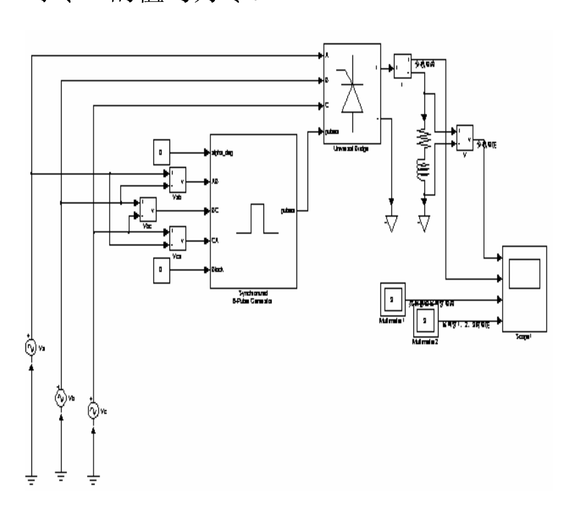


图 5　三相桥式可控整流电路

图 5 中三相交流电源 A、B、C 设定为 220V，50Hz，相位互差 120°；晶闸管三相可控整流桥模型参数设定为晶闸管通态电

阻(Thyristor on-state resistance)0.001Ω，通态电感(Thyristor on-state inductance)0μH，阻容保护回路电阻(Snubber resistance)1e5Ω，电容(Snubber capacitance)inf，测试量（Measurements）设置为 All voltages and currents；三相可控整流桥触发脉冲产生模块设定为双窄脉冲方式(Double pulsing)，脉冲宽度为 10°；建立输出电压 V，输出电流 I，晶闸管 1、2、3 的电压及共阴极组 3 个晶闸管电流检测显示模块，其中晶闸管 1、2、3 的电压及共阴极组 3 个晶闸管的电流用两个多用表（Multimeter）连接到示波器（Scope）上。

设置好各模块参数，点击下拉菜单仿真(Simulation)按钮，选择仿真参数(Simulation parameters)命令设定有关仿真参数。设定停止时间(Stop time)为 0.035 秒，通过调节输入常数(Constant)来调节触发角，其它参数选项的设置与上面介绍的单相整流电路类似。

图 6、图 7 为图 5 所示三相桥式全控整流电路在触发角为 0° 和 60° 的仿真波形。图 6、图 7 中通过共阴极组三个晶闸管的电流的波形，可清楚地看出电流换相过程；通过晶闸管 1，2，3 的电压波形，可清楚地看出电压波形形状相同，只是在坐标轴上平移了 60°；通过输出电流 Id(A)和输出电压 Vd(V)的波形，也可清楚地看出电流由零增加到稳态值的过程，电流大小对晶闸管换流过程的影响。改变各个参数的设定，从而分析每个参数对系统的影响，直到得到满意的结果为止。

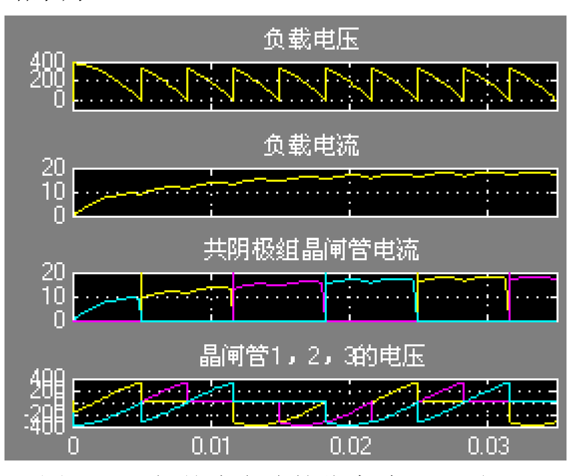


图 6 三相整流电路的仿真波形(0°)

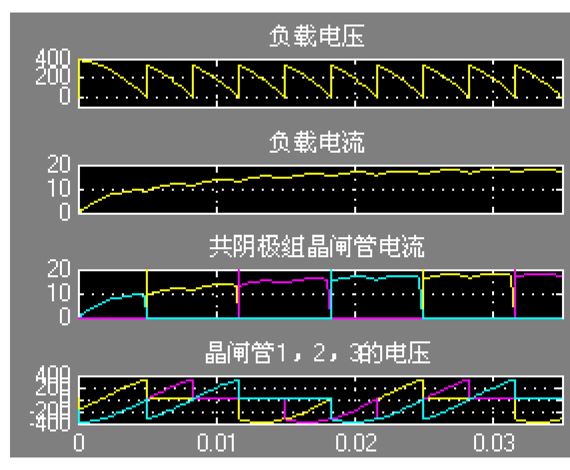


图 7 三相整流电路的仿真波形(60°)

5 结束语

电力电子变流技术的理论计算比较繁琐且很难得到准确的计算结果，从上述系统仿真结果波形可以看出，利用仿真环境 Matlab/Simulink 进行仿真，波形准确、直观，利用该方法还能对非常复杂的电路、电力电子变流系统进行建模仿真。可以通过对仿真结果的分析，反复修改电路参数使系统达到要求的结果和性能，大大简化了设计流程，减轻了设计负担，充分体现了 Simulink 工具的优越性。

参考文献:

[1] 王兆安,黄俊主编.电力电子技术[M].北京:机械工业出版社, 2000.

[2] 李传琦,等.电力电子技术计算机仿真试验.北京:电子工业出版社, 2006.

[3] 邓国扬,盛义发,等. 基于 Matlab Simulink 的电力电子系统的建模与仿真[J].南华大学学报(理工版), 2003, 17(1): 1-6.

[4] 沈艳霞,周平,等. MATLAB 在电力电子学仿真中的应用[J]. 无锡轻工大学学报, 2001, 20(1): 92-94.

作者简介：

张建民（1981-），男，河北沧州人，湖南大学电气与信息工程学院硕士研究生。研究方向为电力电子电路的故障诊断；

何怡刚（1966-）,博士，教授，博导，湖南大学电气工程一级博士点学科和博士后科研流动站学术带头人、中国武汉理论电工学会常务理事、湖南省电机工程学会理事、 湖南省理论电工专委会主任、电路与系统学报编委、全国信息与电子学科研究生教育书系编委、清华大学出版社教材编审会委员等，曾担任 IEEE Int.RTL ATPG&DFT、IEEE Int.SCI 等国际学术会议程序委员会委员及国内一些著名学报的特邀通讯评审专家。目前主要从事模拟集成电路、滤波器、故障诊断等领域的研究工作，在国内外重要学术刊物和 IEEE 国际学术会议上发表论文 180 余篇，其中 78 篇论文被《SCI》、《EI》、《ISTP》收录和引用，主持完成了 18 项具有国际先进水平的重大科研项目；